

平成 21 年 5 月 8 日現在

研究種目：若手（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760308  
 研究課題名（和文） 分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルを併用したRC版のせん断耐力評価法の開発  
 研究課題名（英文） Development of Assessment Method for Punching Shear Behavior of RC Slabs using FEM with Combination of Discrete Crack Model and Smearred Crack Model  
 研究代表者  
 張 広鋒（ZHANG GUANGFENG）  
 独立行政法人土木研究所・構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ・研究員  
 研究者番号：20400062

研究成果の概要：面外力を受ける鉄筋コンクリート（RC）版は、荷重作用点直下のコンクリートが押し出される押し抜きせん断破壊によって終局に至る場合が多く、その耐荷性能を適切に評価することが重要である。本研究では、このようなRC版を対象に、分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルを併用する評価法の考案並びに妥当性検討を行った。検討の結果、提案の評価法を用いることにより、RC版の押し抜きせん断耐力を大略評価可能であることが明らかとなった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	210,000	2,710,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：RC版，押し抜きせん断破壊，三次元有限要素，非線形数値解析，  
 離散ひび割れモデル

## 1. 研究開始当初の背景

（1）面外力を受ける鉄筋コンクリート（RC）版材は、荷重作用点直下のコンクリートが円錐状に押し出される押し抜きせん断破壊によって終局に至る場合が多い。写真-1に、一例として室内実験から得られたRC版の押し抜きせん断破壊状況写真を示す。道路橋床版やスラブの柱頭部等は、押し抜きせん断破壊が発生する可能性のある構造物としてよく取り上げられる。また、山岳トンネルにおけるコンクリート塊落下事故には、押し

抜きせん断破壊によって発生する場合のことが報告されている。

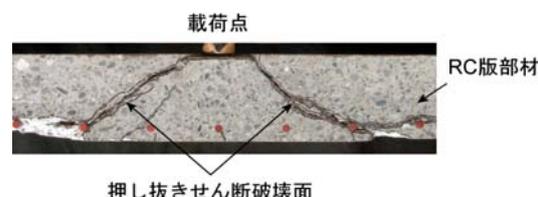


写真-1 押し抜きせん断破壊の一例



写真-2 実験設置状況写真

(2) 現在のところ、押し抜きせん断耐力の評価に関する研究が数多く報告されているが、未だ以下のような検討すべき点が残されている。① 押し抜きせん断破壊の破壊メカニズムの解明に着眼した研究が少なく、そのメカニズムは未だ十分に解明されていない；② 押し抜きせん断破壊型面部材の破壊挙動や耐荷性能を合理的に評価可能な数値解析手法は未だ確立されていない；また、③ 押し抜きせん断破壊の可能性のある部材を有する構造全体系の耐荷・耐震性能照査には、押し抜きせん断破壊を含む構造全体系の破壊挙動や耐荷性能を適切に評価可能な数値解析手法が必要であるが、未だその手法も確立されていない。

(3) また、一般に、RC 面部材の押し抜きせん断破壊は、曲げ破壊と異なり、変形や予兆となるひび割れの発生もなく突発的に発生するものである。従って、一旦発生すると重大な事故を引き起こす可能性があることより、押し抜きせん断耐力に関する合理的な性能照査法を確立することは、社会的に強く要請されている課題の一つである。

## 2. 研究の目的

(1) 以上の背景を踏まえ、本研究では、押し抜きせん断破壊型 RC 版のせん断耐力評価法の提案を目的とした。検討では、分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルを併用する三次元弾塑性有限要素法を用いた。検討の流れとしては、まず、RC 版に関する実験結果を考察し、押し抜きせん断破壊の破壊性状や破壊メカニズムを把握することとした。次に、三次元弾塑性有限要素法に基づき、押し抜きせん断破壊の破壊挙動を適切に再現可能かつ汎用性の高い解析手法を考案することとした。その後、静載荷実験によって実施された RC 版を対象に提案の解析手法を適用し、解析手法の有効性や解析精度を向上させ

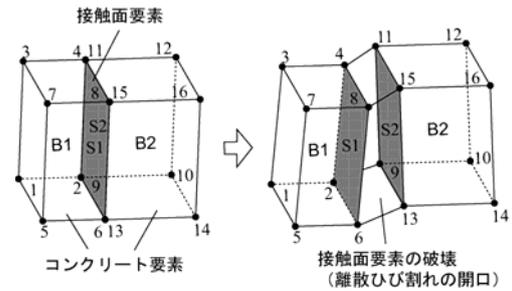


図-1 接触面要素の概念図

るためのパラメータ検討を行うこととした。なお、本研究に用いた RC 版は、申請者が室蘭工業大学在職中に実施したものである。実験は、いずれも 4 辺支持静載荷実験によって行った。写真-2 に、一例として実験状況写真を示す。

## 3. 研究の方法

(1) RC 版の押し抜きせん断耐荷性能は、コンクリートや鉄筋の力学特性の他、押し抜きせん断破壊面の形状や鉄筋のダウエル作用にも強く依存する。押し抜きせん断破壊を数値的に再現するために、押し抜きせん断破壊面における破壊や主鉄筋のすべり等の幾何学不連続破壊を適切に考慮する必要がある。本研究では、離散ひび割れ手法を用いて幾何学不連続破壊をモデル化することとした。離散ひび割れ手法は、予め仮定したひび割れ発生位置に接触面要素 (Interface element) を配置し、その接触面要素の破壊によってコンクリートのひび割れ破壊をモデル化するものである。ここで、接触面要素は、2 つの面によって構成される厚さのない特殊な要素である。図-1 に接触面要素の概念図を示す。接触面要素の破壊は、接触面要素を構成する両面間に発生する応力と相対変位を用いて判定する。一方、コンクリートに発生する微小ひび割れは、分布ひび割れモデルを用いてモデル化することとした。以上のように、本研究では、分散ひび割れモデルと離散ひび割れモデルを併用することによって、コンクリートに発生する微小ひび割れおよび押し抜きせん断破壊面等における幾何学不連続破壊の両方をモデル化することとした。

(2) 提案の解析手法では、以下のように解析モデルを構築することとした。

① 押し抜きせん断破壊面のモデル化に関しては、実験結果を参考とし、押し抜きせん断破壊面をある傾斜角度を有する円錐面と仮定した。仮定した円錐面に接触面要素を配置し、押し抜きせん断破壊面における幾何学不

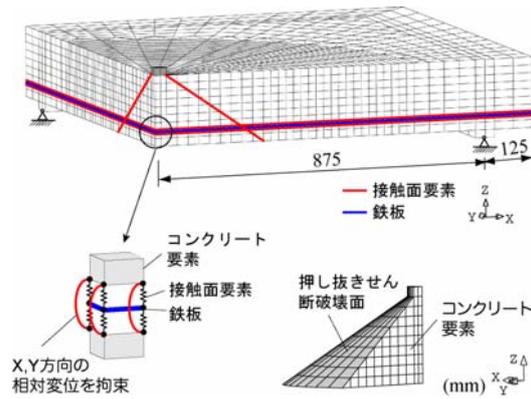


図-2 解析モデル (35°モデル)

連続破壊をモデル化することとした。

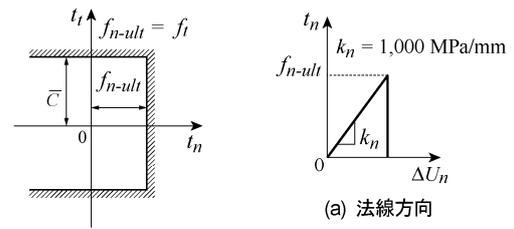
② コンクリートのモデル化に関しては、三次元固体要素を用いてモデル化し、分布ひび割れモデルを適用することによってひび割れ破壊をモデル化することとした。

③ 鉄筋のモデル化に関しては、実構造物のように複雑な配筋状況に対しても簡易に対応可能にするため、2方向に配置した鉄筋を一枚の等方材料鉄板に平均化することとした。鉄板の厚さは、鉄筋の断面積と等価になるようにして決定した。鉄板とコンクリート間の付着応力は、鉄筋とコンクリート間の全付着力と等価になるように換算付着応力を用いて評価することとした。

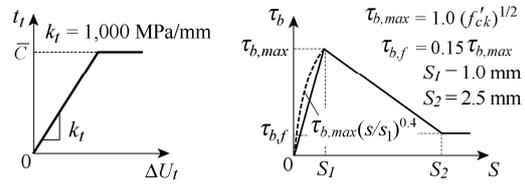
(3) 解析では、解析対象の対称性を考慮して供試体の1/4をモデル化することとした。図-2に解析モデルの一例を示す。鉄筋をモデル化する鉄板は鉄筋の中心位置に配置し、鉄筋のすべりをモデル化するために鉄板の上下に接触面要素を配置した。なお、鉄板の配置によって分離されたコンクリートの連続性を保持するため、鉄板の上下におけるコンクリート要素間の水平2方向相対変位を拘束した。また、境界条件は、解析対象の連続性を考慮し、両対称切断面の法線方向変位成分を拘束した。

(4) 幾何学不連続破壊のモデル化に関しては、本研究では、図-3に示す Coulomb friction 型の応力-相対変位関係を接触面要素に適用することにより、押し抜きせん断破壊面やコンクリートと鉄板間の幾何学不連続破壊をモデル化することとした。

① 押し抜きせん断破壊に関しては、法線方向の引張破壊は、法線方向応力  $f_{n-ult}$  がコンクリートの引張強度  $f_t$  に達した時点で破壊するように設定した (図-3(a))。接線方向のせん断破壊は、せん断応力が粘着力  $\bar{C}$  に達した後、粘着力  $\bar{C}$  を保持した状態でせん断す



(a) 法線方向



(b) 接線方向

(押し抜きせん断破壊面)

(c) 接線方向

(鉄筋とコンクリート間)

図-3 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

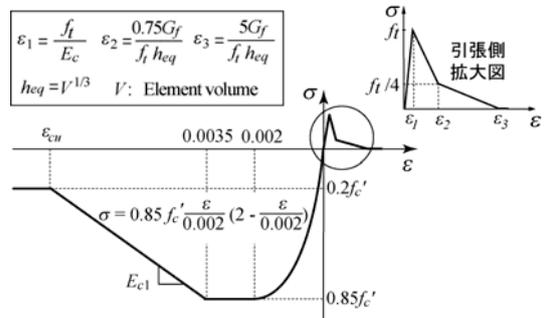


図-4 コンクリートの応力-ひずみ曲線

べりが生じるように設定した (図-3(b))。ここで、粘着力  $\bar{C}$  はコンクリートの圧縮強度  $f'_c$  と内部摩擦角  $\phi$  を用いて次式のように算出した。

$$\bar{C} = f'_c \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} \quad (1)$$

② 鉄板とコンクリート間の破壊に関しては、法線方向の剥離は、法線方向応力  $f_{n-ult}$  がコンクリートの引張強度  $f_t$  に達した時点で剥離するように設定した (図-3(a))。せん断方向には、図-3(c)に示す付着応力-相対変位関係を適用した。このモデルは、CEB-FIP モデルコードによる鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係の  $0 \sim S_1$  間の曲線 (破線) を直線に簡略化したモデル (実線) である。

(5) 材料非線形のモデル化に関しては、コンクリートには、図-4に示す応力-ひずみ曲線を適用した。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件を適用し、内部

表-1 対象供試体の一覧

供試体名	載荷盤直径 (mm)	鉄筋呼び径	鉄筋間隔 (mm)	鉄筋比 (%)
S1	60	D13	100	1.00
S2	60	D19	200	1.23
S3	60	D16	150	1.09
S4	120	D16	150	1.06

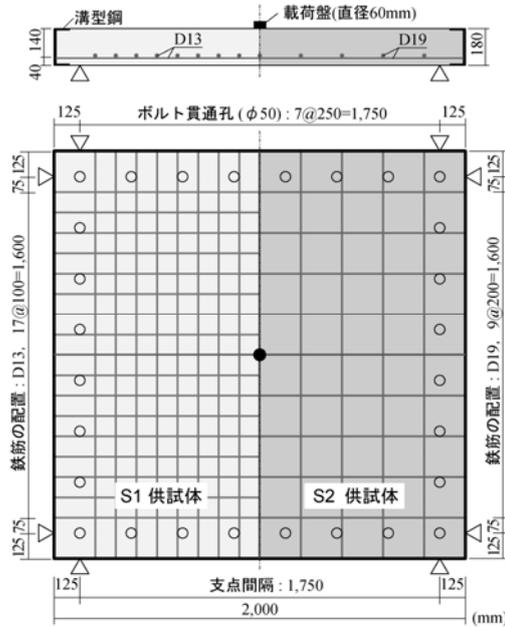


図-5 供試体の概要

摩擦角を  $30^\circ$  とした。引張強度  $f_t$  および破壊エネルギー  $G_f$  は、それぞれ、CEB-FIP モデルコードによる式 (2) と式 (3) によって算出した。

$$f_t = 1.4(f'_{ck}/10)^{2/3} \quad (2)$$

$$G_f = G_{f0}(f'_c/10)^{0.7} \quad (3)$$

ここで、 $G_{f0}$  は粗骨材の大きさに基づいた定数である。また、鉄筋をモデル化する鉄板には、塑性硬化を考慮した弾塑性モデルを適用し、塑性硬化勾配は弾性係数の 1% とした。降伏の判定は von Mises の降伏条件に従うものとした。

(6) 解析では、変位制御により増分解析を行い、収束計算には一般に広く用いられる Newton-Raphson 法を採用した。

(7) また、本研究では、表-1 に示す 4 体の RC 版を検討対象とした。これらの供試体は、押し抜きせん断耐力に及ぼす鉄筋の配筋

率と載荷盤サイズの影響を検討するもので

表-2 解析ケースの一覧

解析ケース	押し抜きせん断破壊面		鉄筋のすべり
	モデル化の有無	傾斜角度	
ケース 1	なし	—	考慮しない
ケース 2	なし	—	考慮する
ケース 3	あり	$45^\circ$	考慮する

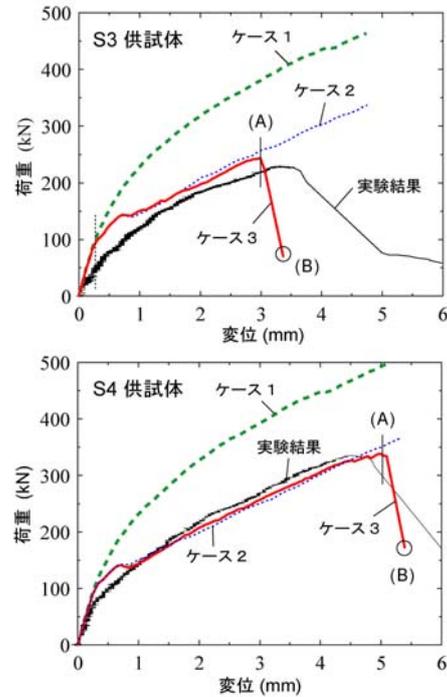


図-6 荷重-変位関係

ある。図-5 に、一例として、S1 と S2 両供試体の概要図を示す。

#### 4. 研究成果

(1) 本研究では、押し抜きせん断破壊型 RC 版のせん断耐力評価法の提案を目的に、分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルを併用する三次元弾塑性有限要素法に基づく解析手法の有効性検討および解析精度を向上させるためのパラメータの影響検討を行ってきた。本研究の成果は、以下のようである。

(2) 解析手法の有効性検討では、表-1 に示す各供試体に対して表-2 に示す 3 つの解析ケースを設け、解析結果を実験結果と比較することにより解析手法の有効性や解析方法の設定を検討した。ここで、解析ケース 1 と 2 は、押し抜きせん断破壊面や鉄筋すべりのモデル化の有無の影響を検討するものである。解析ケース 3 は提案する解析手法である。これらの検討では、押し抜きせん断破

壊面の傾斜角度は便宜的に  $45^\circ$  とした。図

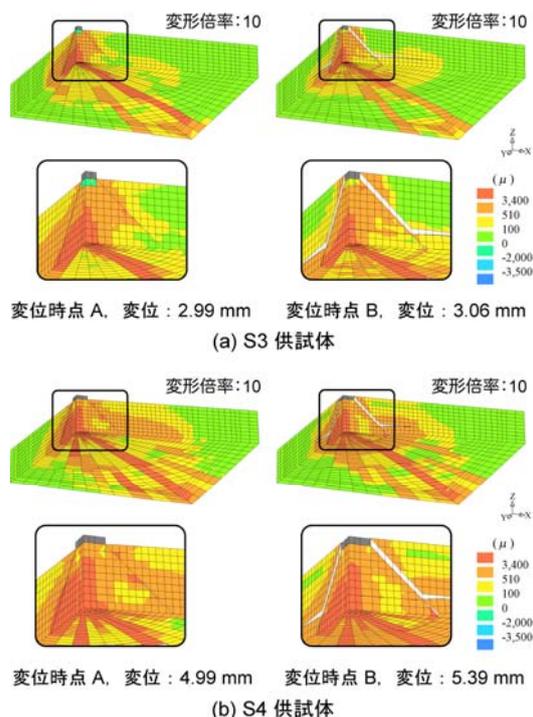


図-7 ひび割れ状況

ー6に、例として載荷盤サイズが異なる S3 と S4 供試体の荷重-変位関係に関する解析結果と実験結果の比較を示す。図-7は、両供試体の最大荷重時および解析終了時における解析結果のひび割れ状況である。検討の結果、提案の解析手法(ケース3)を用いることにより、RC版の押し抜きせん断耐荷性状を大略再現可能であることが明らかとなった。解析結果の最大荷重値は、4体の供試体のいずれも実験結果の85%~106%となった。一方、幾何学不連続破壊を考慮しないケース1や鉄筋のすべりのみを考慮するケース2に関しては、いずれも実験結果を適切に再現できていない。

(3) 解析精度に及ぼす押し抜きせん断破壊面の傾斜角度の影響を検討するために、傾斜角度を  $35^\circ$ 、 $40^\circ$  および  $45^\circ$  の3つの解析ケースとし解析的検討を行った。検討対象は S1 供試体のみとした。ここで、これらの傾斜角度は、実験結果の押し抜きせん断破壊面の傾斜角度を参考にして仮定したものである。押し抜きせん断破壊面の傾斜角度は、RC版の剛性によって異なるが、一般的に  $35^\circ$  ~  $45^\circ$  の範囲内である。図-8に荷重-変位関係に関する比較図を示す。比較検討の結果、押し抜きせん断破壊面の傾斜角度が大きい程、解析はより小さい変位で押し抜きせん断破壊によって終局に至り、最大荷重を低く評

価する傾向がある。各解析ケースから得られ

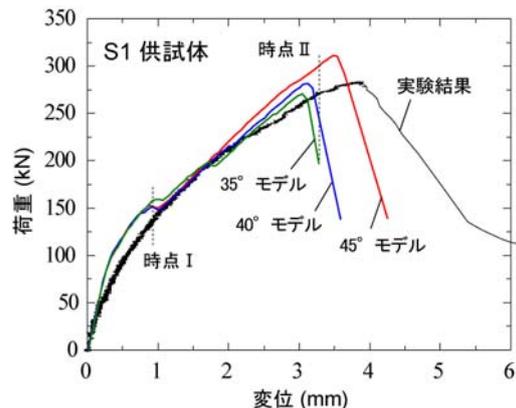


図-8 荷重-変位関係

た最大荷重値は、それぞれ、実験結果の109.7% ( $35^\circ$  モデル)、99.4% ( $40^\circ$  モデル) および 95.5% ( $45^\circ$  モデル) となった。 $40^\circ$  モデルの場合は実験結果を最も精度よく再現できた。但し、いずれの解析結果は、実験結果との差異が10%以内となっているため、押し抜きせん断破壊面の傾斜角度を  $35^\circ$  ~  $45^\circ$  と設定すれば、実験結果を大略再現可能であることが考えられる。

(4) 本研究の実施により、RC版の押し抜きせん断破壊挙動や押し抜きせん断耐力を大略再現可能な評価法を提案した。提案の評価法は、三次元有限要素法に基づいたものであるため、部材単体のみではなく、押し抜きせん断破壊の可能性のある部材を有する構造全体系の耐荷性能評価にも容易に適用可能である。

(5) なお、提案の評価法は、分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルを併用して材料非線形破壊と幾何学的不連続破壊をモデル化することが特徴的であり、RC版の押し抜きせん断耐力の評価法として国内外においても独創的である。また、本研究結果は、RC版のみではなく、他のRC構造物に関する同種の研究にも有益な参考資料になると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

張 広鋒: 離散ひび割れを考慮した押し抜きせん断破壊型RC版の破壊挙動解析, 土木学会年次学術講演会, 2008.09

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

張 広鋒 (ZHANG GUANGFENG)

独立行政法人土木研究所・構造物メンテナンス  
研究センター橋梁構造研究グループ・研究  
員